



東南大學 能源与环境学院  
Southeast University School of Energy and Environment

# 反应堆控制及核电站仪控系统

核工程与核技术本科专业课

陈 达 核科学与技术系

2023年3月23日

# 本课程教学内容

第一章 绪论（陈达）

第二章 热工对象与PID控制（黄东篱）

第三章1 串级控制系统（黄东篱）

第三章2 导前微分双回路系统（黄东篱）

**第三章3 前馈-反馈控制系统（陈达）**

第三章4 比值控制系统（陈达）

第三章5 大迟延控制系统（陈达）

第三章6 多变量控制（陈达）

复杂控制系统理论

第四章 蒸汽发生器水位控制系统（陈达）

第五章 稳压器控制系统（陈达）

第六章 反应性控制（黄东篱）

第七章 负荷控制（黄东篱）

反应堆控制系统

# 第三章 复杂控制系统

## 3.3 前馈-反馈控制系统

(对应教材第六章)

### 3.1.1 前馈控制的基本原理

### 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

### 3.1.3 前馈控制器参数的整定

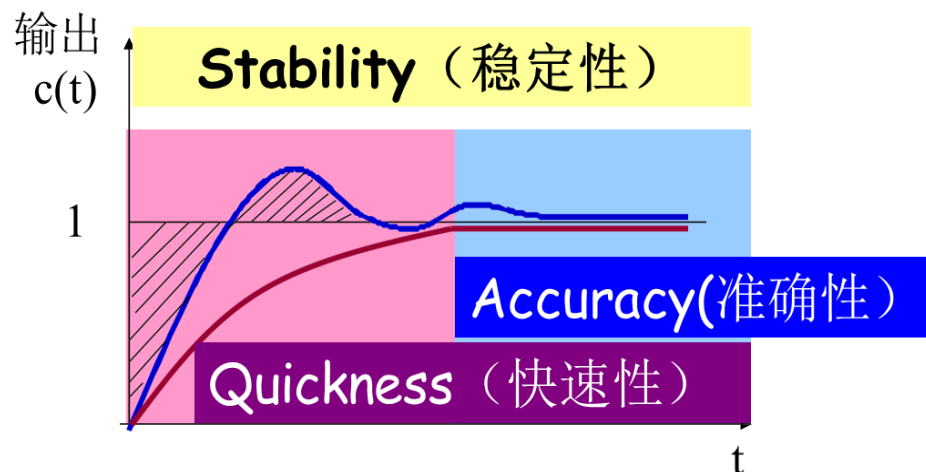
### 3.1.4 工程应用实例

### 3.1.1 前馈系统的基本原理

#### 一、为什么需要前馈控制？

在反馈控制系统中，由于**被控对象的惯性**，从调节量的改变到被调量发生变化**需要一定的时间**，所以干扰出现后，要使被调量回到给定值需要时间。当被控对象的**时间常数较大**时，**偏差持续时间长**，**被调量波动浮动大**，因此单纯的反馈控制往往不能满足生产实际需求。

提高控制品质！



### 3.1.1 前馈系统的基本原理

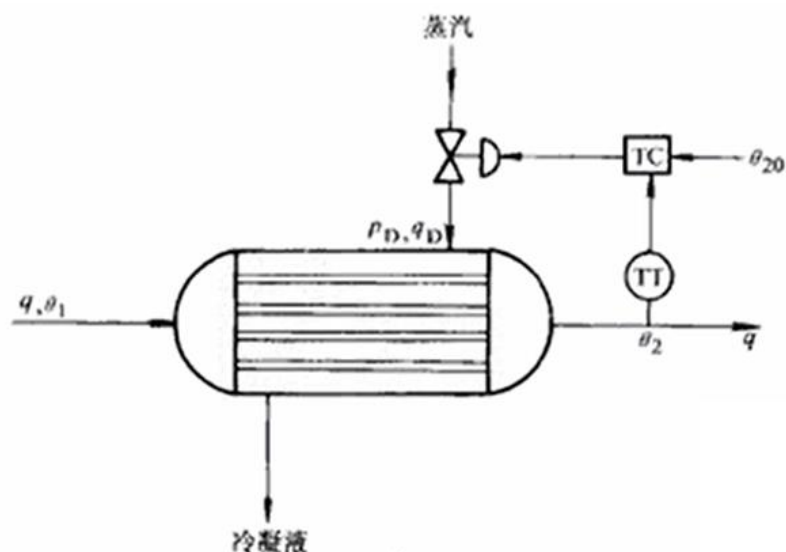
#### 二、前馈控制的概念

**前馈控制：**按扰动量的方向和大小进行控制。当扰动出现偏差，控制器直接根据测得扰动大小和方向，**及时补偿干扰对被控量的影响**，从而消除偏差，是一种开环控制。

**反馈控制：**按被控量的偏差进行控制。当扰动引起被控量出现偏差，控制器才有动态输出来补偿干扰对被调量的影响，是一种利用偏差来消除偏差的控制系统。**控制作用落后于扰动**。

### 3.1.1 前馈系统的基本原理

#### 三、反馈控制的原理：以换热器温度控制系统为例

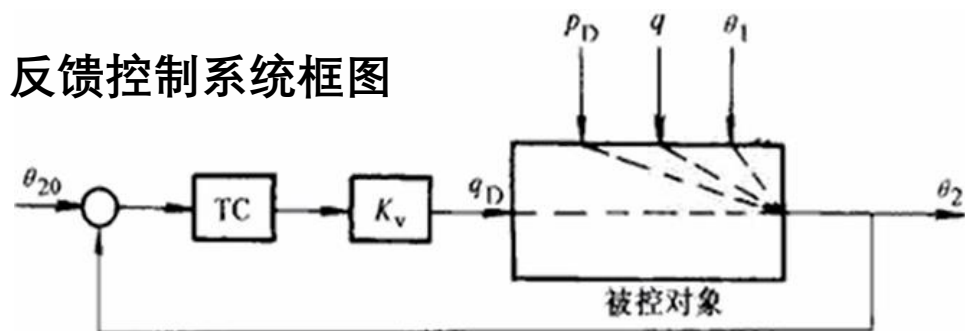


$\theta_2$  热流体温度；  $\theta_1$  冷流体温度；  
 $q$  流体流量；  $q_D$  蒸汽流量；  $p_D$  蒸汽  
压力；  $TT$  温度测量；  $\theta_{20}$  热流体  
温度给定值；  $TC$  温度调节器；  $K_V$  温  
度调节阀门。

**控制过程（负反馈调节）：** 扰动发生→引起工质出口温度发生变化→使其偏离给定值→温度调节控制器按被控量偏差的方向和大小产生控制作用→调节阀动作改变加热用蒸汽的流量→补偿扰动对被控量的影响。

## 3.1.1 前馈系统的基本原理

### 三、反馈控制的原理：以换热器温度控制系统为例

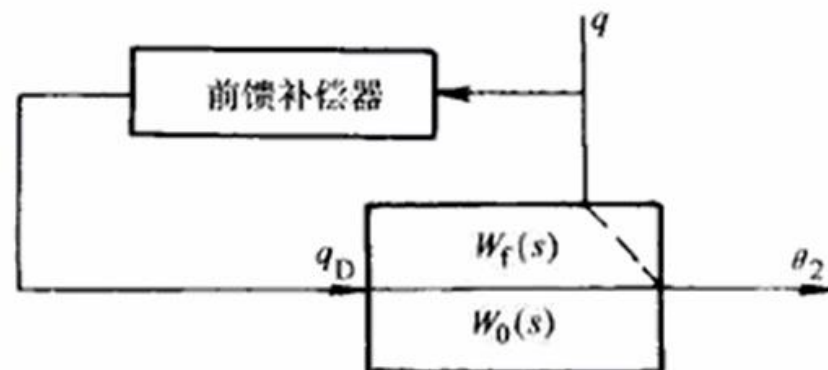
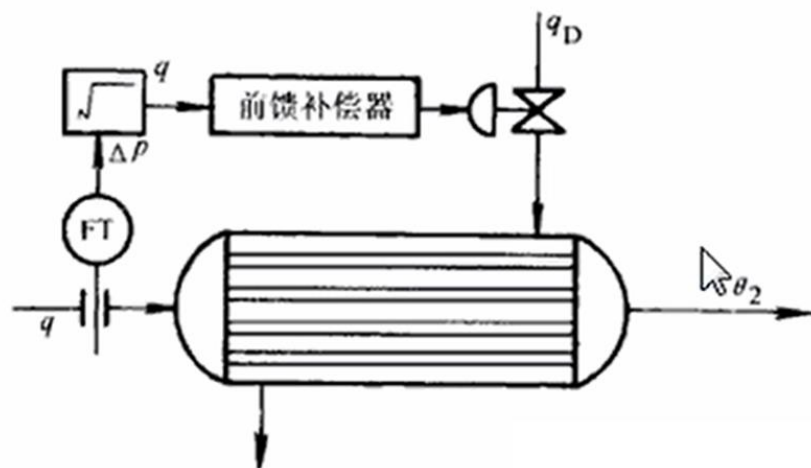


反馈控制系统的特点：

- 反馈控制的本质是“基于偏差来消除偏差”。
- 总要等到被控量发生偏差后，调节器才开始调节，调节器的动作总要落后扰动作用的发生，是一种“不及时”的控制：
- 闭环系统，存在“稳定性”问题。
- 可消除多种扰动对被控量的影响。

### 3.1.1 前馈系统的基本原理

#### 四、前馈控制的原理：以换热器温度控制系统为例



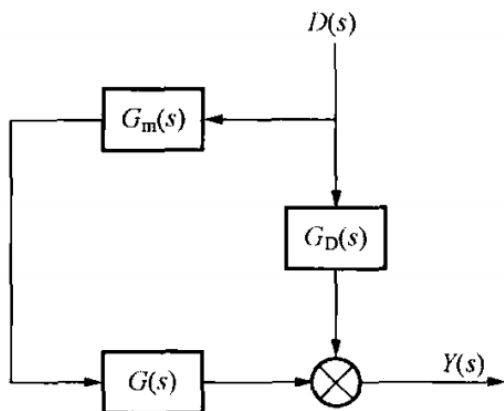
#### 控制过程：

主要扰动—物料流量 $q$ ；变化频繁，变化幅值大，且对出口温度 $\theta_2$ 的影响最为显著；通过测量物料流量 $q$ ，并将流量信号送到前馈补偿器；前馈补偿器根据其输入信号，按照一定的运算规律操作调节阀；从而改变加热用蒸汽流量 $q_D$ ，以补偿物料流量 $q$ 对被控温度的影响。



### 3.1.1 前馈系统的基本原理

#### 五、前馈控制系统的数学模型



前馈控制系统框图

$D(s)$ : 扰动

$Y(s)$ : 被控参数

$G_D(s)$ : 为干扰通道传递函数

$G(s)$ : 为控制通道的传递函数

$G_m(s)$ : 为前馈控制器的传递函数

干扰 $D(s)$ 对输出 $Y(s)$ 的传递函数为:

$$Y(s) = G_D(s)D(s) + G(s)G_m(s)D(s)$$

### 3.1.1 前馈系统的基本原理

#### 六、前馈控制器的设计

$$Y(s) = G_D(s)D(s) + G(s)G_m(s)D(s)$$

按**不变性原理**设计前馈补偿器：即使被调量与扰动无关

完全补偿的条件：

$$Y(s) = 0$$

前馈控制器的数学模型：

$$G_m(s) = -\frac{G_D(s)}{G(s)}$$

- 前馈控制器的依对象不同而不同，需采用专用算法
- 而反馈控制一般为通用PID算法

### 3.1.1 前馈系统的基本原理

#### 七、前馈控制系统的特点：

- 基于扰动来消除扰动对被控量的影响：**前馈控制“及时”动作**；
- 只适合于可测不可控的扰动；（1）**可测**：扰动量可以通过测量变送器，在线地将其转换为前馈补偿器所能接受的信号。（2）**不可控**：扰动量与控制量之间的相互独立性，即控制通道的传递函数与扰动通道的传递函数无关联，从而控制量无法改变扰动量的大小。
- 控制规律取决于被控对象的特性；**一种前馈控制只能克服一种扰动**。
- 由于扰动通道和控制通道的数学模型很难准确求出，完全补偿难以实现。
- 属于开环控制，只要系统中各环节是稳定的，则控制系统必然稳定；

### 3.1.1 前馈系统的基本原理

---

小结：

- 前馈控制的数学模型
- 前馈控制器的设计思想（不变性原理）
- 前馈控制的特点
- 前馈与反馈的比较

# 第三章 复杂控制系统

## 3.3 前馈-反馈控制系统

(对应教材第六章)

3.1.1 前馈控制的基本原理

3.1.2 前馈控制系统的典型结构

3.1.3 前馈控制器参数的整定

3.1.4 工程应用实例

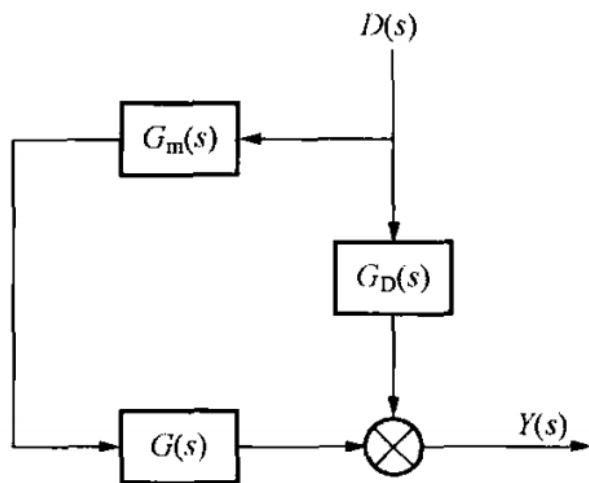
## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

---

- 一、单纯前馈控制（静态/动态）
- 二、前馈-反馈控制
- 三、前馈-串级控制
- 四、适用范围

## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

### 一、单纯前馈控制系统



系统方框图

为什么可以做这样的假设

$$Y(s) = G_D(s)D(s) + G(s)G_m(s)D(s)$$

不变性原理

$$Y(s) = 0$$

$$G_m(s) = -\frac{G_D(s)}{G(s)}$$

干扰通道的  
传递函数为

$$G_D(s) = \frac{K_1}{T_1s + 1} e^{-\tau_1 s}$$

控制通道的  
传递函数为

$$G(s) = \frac{K_2}{T_2s + 1} e^{-\tau_2 s}$$

## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

### 一、单纯前馈控制系统（静态前馈）

当干扰通道与控制通道的  
延迟时间 $\tau_1 = \tau_2$ 时

$$G_m(s) = -\frac{G_D(s)}{G(s)} = -\frac{K_1}{K_2} \frac{T_2s + 1}{T_1s + 1} = K_f \frac{T_2s + 1}{T_1s + 1}$$

当 $T_1 = T_2$ 时，控制通道与干扰通道的动态特性完全相同：

$$G_m(s) = K_f$$

- 此时，前馈控制器是一个比例环节， $K_f$ 是静态前馈系数，
- 可满足稳态不变性设计要求，对模型精度依赖不大，易实现；有动态偏差，动态偏差与 $T_1$ 、 $T_2$ 的差值有关

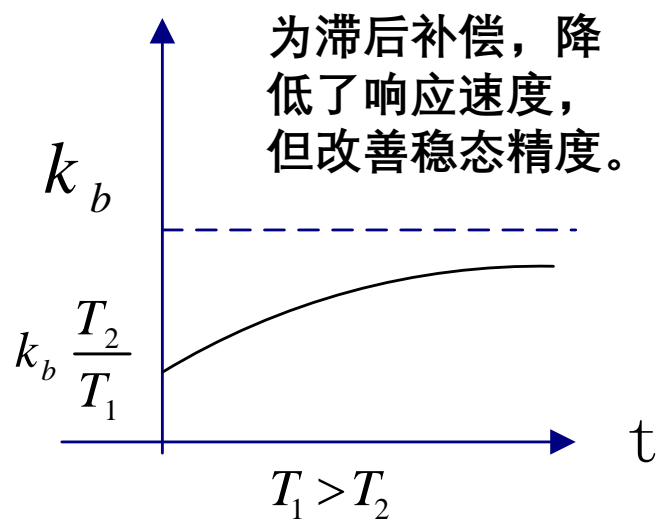
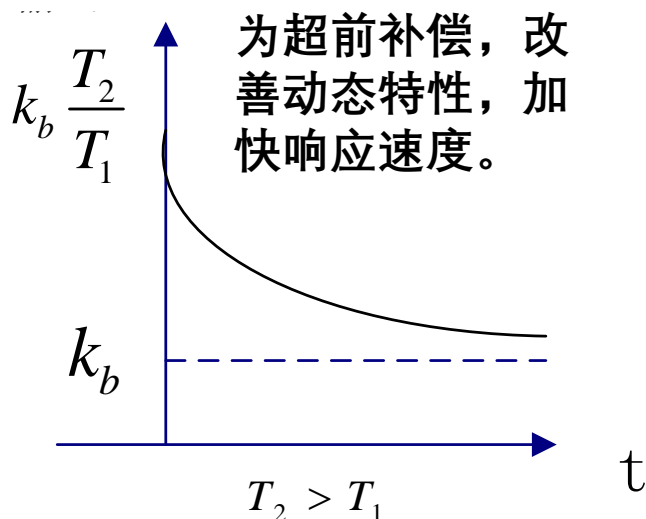


## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

### 一、单纯前馈控制系统（动态前馈）

当干扰通道与控制通道的延迟时间 $\tau_1 = \tau_2$ ， $T_1 \neq T_2$ 时，

$$G_m(s) = -\frac{G_D(s)}{G(s)} = -\frac{K_1}{K_2} \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1} = K_f \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1}$$



可满足绝对不变性设计要求，无动态偏差；对模型精度依赖很大，可能不可实现

## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

### 一、单纯前馈控制系统的特点

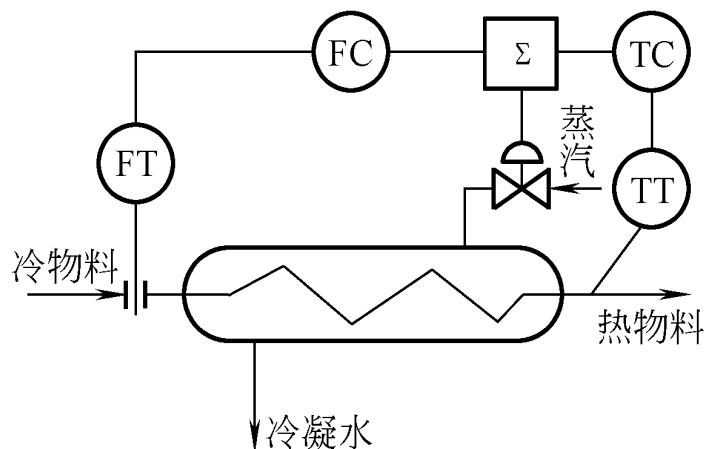
动态前馈控制，是指通过选择合适的前馈控制器，使干扰信号经过前馈控制器到被调量的控制通道的动态特性能完全复制干扰通道的动态特性，并使它们的符号相反，从而实现对干扰信号进行完全补偿的目标。这种控制方案不仅保证了系统的静态偏差等于零或接近于零，而且也保证了动态偏差等于零或接近于零。

工业对象的特性往往是很复杂的，不同的设备有不同的动态特性，有些对象往往是高阶并具有分布参数，要用机理分析很困难，只能把高阶降为低阶处理，分布参数作集中参数处理，这样所得到的动态特性其精度就低。另外，由试验获得的对象动态特性也不精确。基于上述原因，动态前馈只是近似的动态前馈，不能实现完全补偿

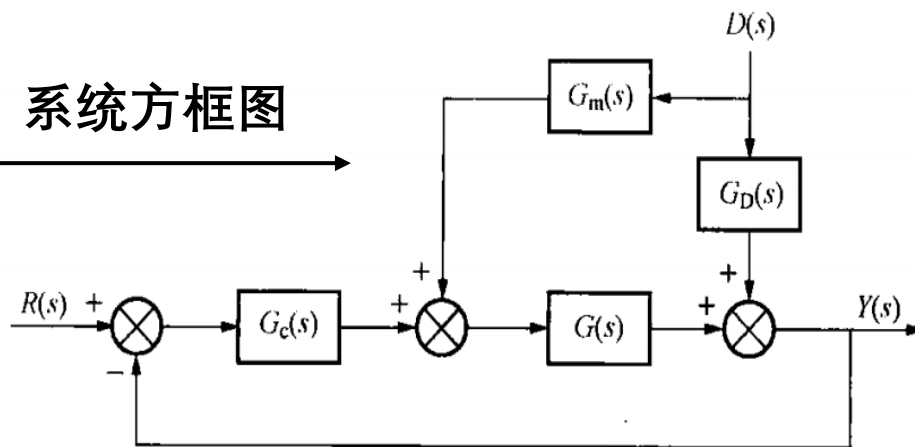
## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

### 二、前馈-反馈控制系统（结构）

以换热器出口温度控制系统为例



系统方框图

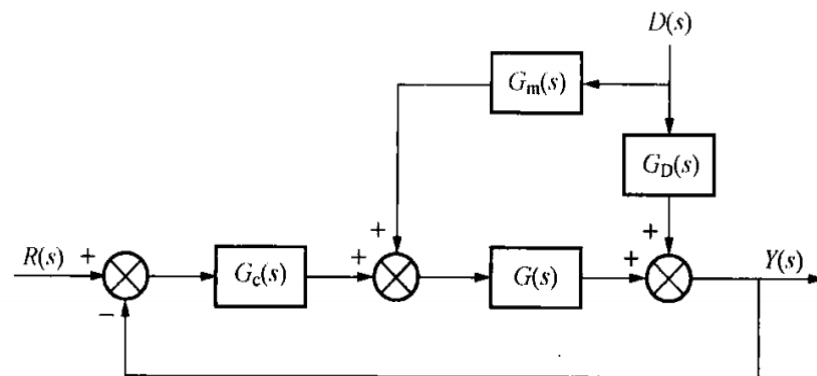


系统中有两个控制器：一个是前馈控制器 $G_m(s)$ ；另一个为反馈控制器 $G_c(s)$

## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

### 二、前馈-反馈控制系统（传递函数）

首先讨论 $R(s)$ , 令扰动 $D(s)=0$ , 系统与单纯反馈系统一样。反馈控制器 $W_c(s)$ 与反馈控制系统相同, 由特征方程决定。



再讨论 $D(s)$ , 令设定值 $R(s)=0$ ,

$$D(s)G_D(s) + [D(s)G_m(s) - Y(s)G_c(s)]G(s) = Y(s)$$

整理得：

$$D(s)[G_D(s) + G_m(s)G(s)] = Y(s)[1 + G_c(s)G(s)]$$

则扰动作用下的闭环传递函数为：
$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_D(s) + G_m(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)}$$

## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

### 二、前馈-反馈控制系统（前馈控制器）

依据不变性原则， $D(s) \neq 0$ 时,要求  $Y(s) \equiv 0$ ,可得

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_D(s) + G_m(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad \Rightarrow \quad G_D(s) + G_m(s)G(s) = 0$$

实现完全补偿时，前馈控制器的传递函数为：

$$G_m(s) = -\frac{G_D(s)}{G(s)}$$

与单纯前馈控制系统完全相同！

对于主要干扰，前馈-反馈控制系统中前馈控制器的控制规律与单纯前馈系统一样！

### 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

#### 二、前馈-反馈控制系统（模型失配时的误差分析）

$$D(s)[G_D(s) + G_m(s)G(s)] = Y(s)[1 + G_c(s)G(s)]$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_D(s) + G_m(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)}$$

当模型出现失配时： $G_D(s) + G_m(s)G(s) \neq 0$

比较 {

单纯前馈时误差为： $Y(s) = [G_D(s) + G_m(s)G(s)]D(s)$

前馈-反馈时误差为： $Y(s) = \frac{G_D(s) + G_m(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} D(s)$

扰动对被控量的影响降低了！

大于1

## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

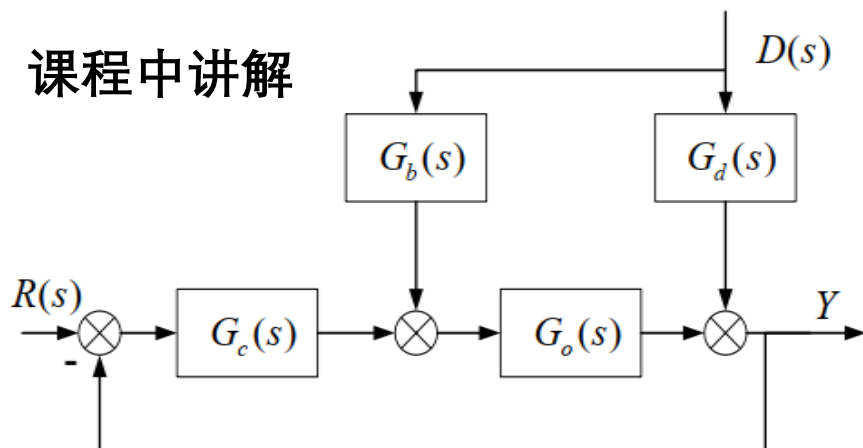
### 二、前馈-反馈控制系统的特性

1. 在前馈控制基础上加反馈控制，可以大大简化前馈控制系统，只需对主要干扰进行前馈补偿，其他干扰可依靠反馈克服，这样既简化了系统结构，又**保证了控制精度**。
2. 由于反馈回路的存在，**降低了对前馈控制器精度的要求**。若前馈控制对扰动引起的被调量偏差不能完全补偿，其余部分可由反馈来克服，进而消除偏差。
3. 在单纯的反馈控制系统中，提高控制精度和系统稳定性是一对矛盾，往往为保证系统的稳定性而无法实现高精度的控制。而前馈—反馈控制在**不降低系统稳定性的前提下，通过引入前馈控制可以提高精度的控制，并且如果控制及时，将显著提高控制质量**。

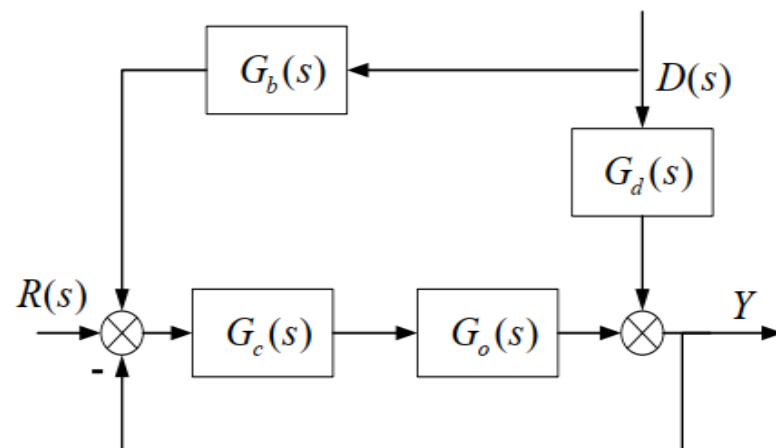
## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

### 二、前馈-反馈控制系统的两种结构（思考题）

课程中讲解



前馈信号接在反馈控制器之后



前馈信号接在反馈控制器之前

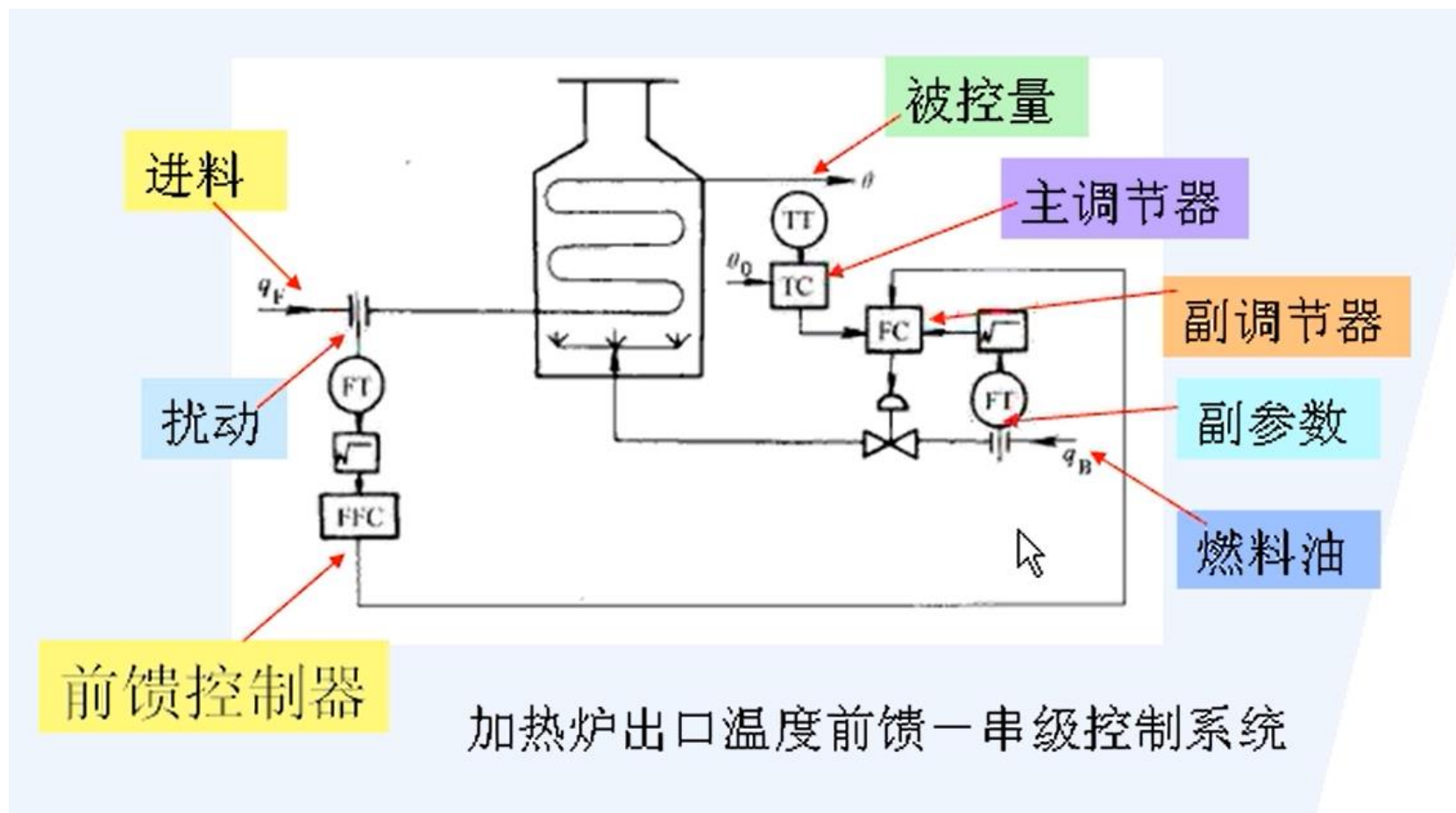
既有反馈的优点，又有前馈的优点；  
而且两个控制器的设计相互独立；  
降低了前馈对模型精度的要求

1. 系统在扰动作用下的传递函数？
2. 前馈控制器的数学模型？
3. 模型失配时的误差分析？
4. 与另一种结构相比的优缺点？



### 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

### 三、前馈-串级控制系统（举例）

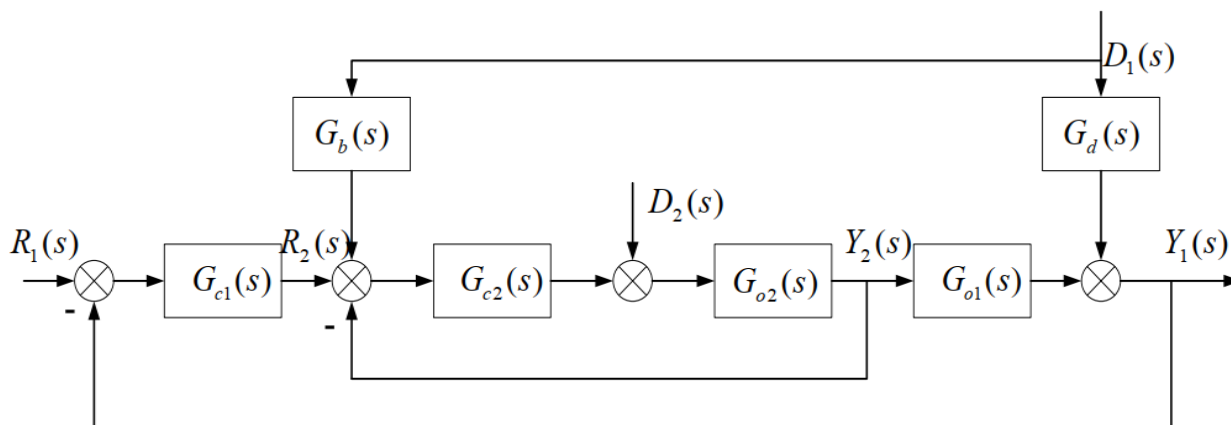


## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

### 三、前馈-串级控制系统特性

如果被控对象受多种干扰影响，有的干扰可测，有的干扰不可测，而且干扰频繁剧烈，且对被控参数的精度要求又很高时，可采用前馈-串级控制方式。

将不可测的干扰包括在串级的副回路中，同时将可测的主要干扰包括在前馈控制中。这样既利用了串级回路对二次干扰有很强的克服能力，又利用前馈控制的特点，能同时克服进入前馈回路和进入串级副回路的干扰对被控参数的影响。



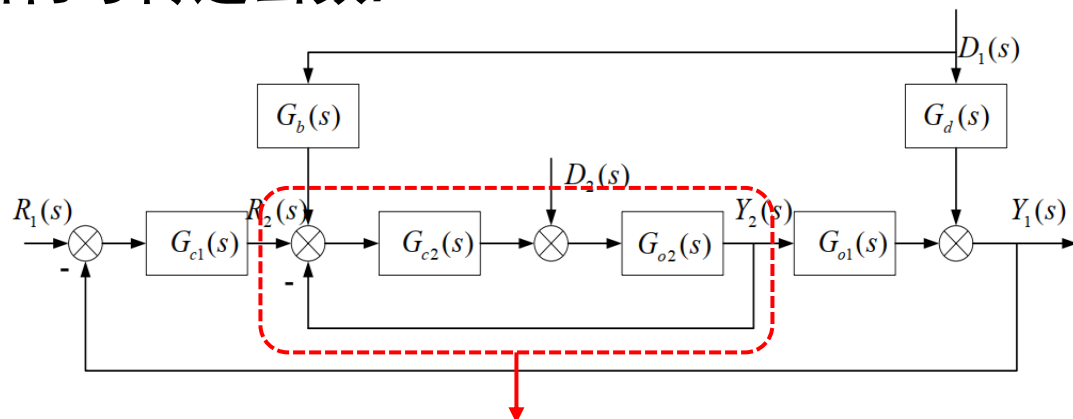
前馈-串级控制系统方框图

## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

### 三、前馈-串级控制系统（结构与传递函数）

首先讨论 $R(s)$ , 令扰动 $D(s)=0$ , 系统框图与串级控制系统一样。主控制器和串级副控制器与串级控制系统一样, 由特征方程决定。

再令设定值 $R_1(s)=0$ , 可得扰动作用下系统的传递函数为:



副回路等效传递函数为:

$$G_2(s) = \frac{Y_2(s)}{R_2(s)} = \frac{G_{c2}(s)G_{o2}(s)}{1 + G_{c2}(s)G_{o2}(s)}$$

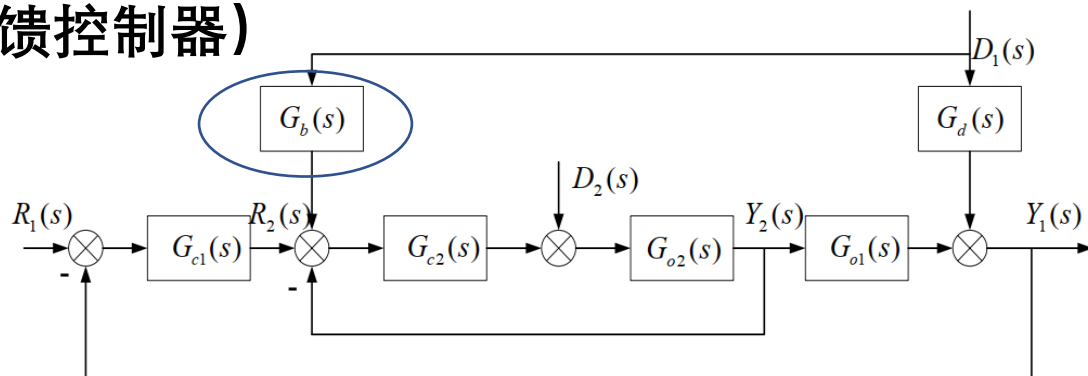
$$\frac{Y_1(s)}{D_1(s)} = \frac{G_d(s) + G_2(s)G_{o1}(s)G_b(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{o1}(s)G_2(s)}$$

## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

### 三、前馈-串级控制系统（前馈控制器）

系统的传递函数

$$\frac{Y_1(s)}{D_1(s)} = \frac{G_d(s) + G_2(s)G_{o1}(s)G_b(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{o1}(s)G_2(s)}$$



依据不变性原则， $D_1(s) \neq 0$ 时，要求 $Y_1(s) \equiv 0$ ，可得前馈控制器的传递函数为：

$$G_d(s) + G_2(s)G_{o1}(s)G_b(s) = 0 \quad \Rightarrow \quad G_b(s) = -\frac{G_d(s)}{G_2(s)G_{o1}(s)}$$

串级控制系统中，当副回路的工作频率远大于主回路工作频率时（副回路的反应快时间常数小），副回路是个快速随动系统，其闭环传递函数 $G_2(s) \approx 1$ 。

此时：  $G_b(s) = -\frac{G_d(s)}{G_{o1}(s)}$

在前馈-串级控制系统中，前馈控制器的数学模型由系统扰动通道及主过程控制通道的特性之比决定。

## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

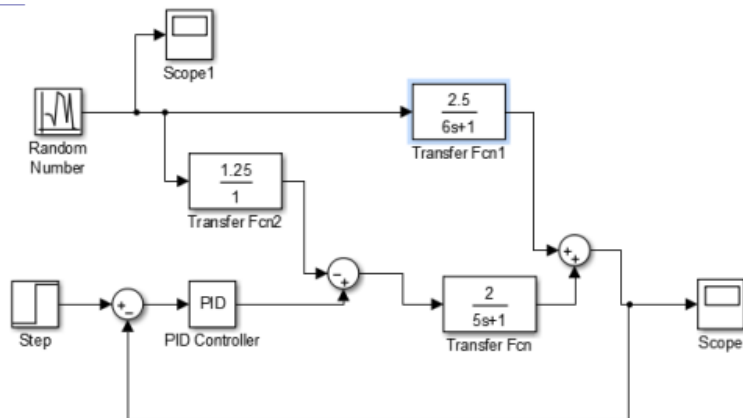
### 四、前馈控制系统的适用范围

当生产过程中存在较大的可测而不可控的扰动，而系统控制精度要求较高，单纯反馈控制又不能满足工艺要求时，可以考虑选用前馈控制：

- 1、当系统中存在一个频率高、幅值大、可测而不可控的扰动；
  - ✓ 当扰动通道与控制通道的惯性接近时，选用静态前馈；
  - ✓ 当扰动通道的惯性小于控制通道的时候，选用动态前馈；
  - ✓ 当系统扰动通道惯性明显大于控制通道的惯性时不必用前馈
- 2、当系统存在两个比较大的扰动且频繁出现时；且其中一个为可测而不可控的动时可用前馈-串级。

## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

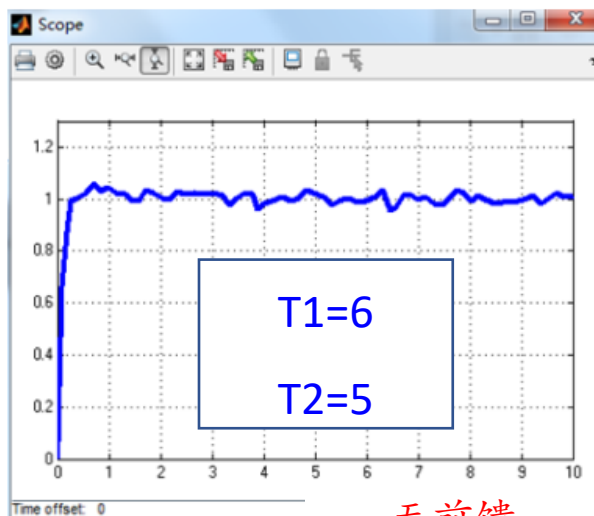
当扰动通道与控制通道的惯性接近时，选用静态前馈



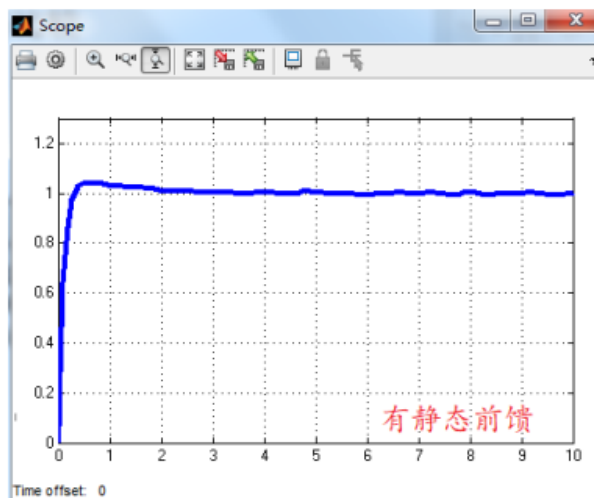
$$\text{PID: } 25\left(1 + \frac{1}{1.25s}\right)$$

扰动通道时间常数 $T_1=6$

控制通道时间常数 $T_2=5$



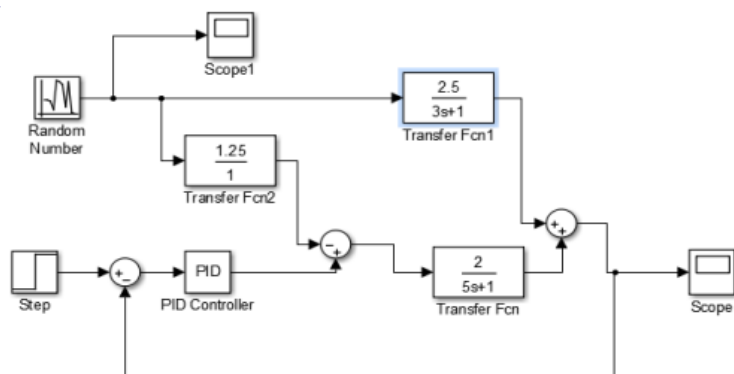
无前馈



为滞后补偿，  
改善稳态精度。

## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

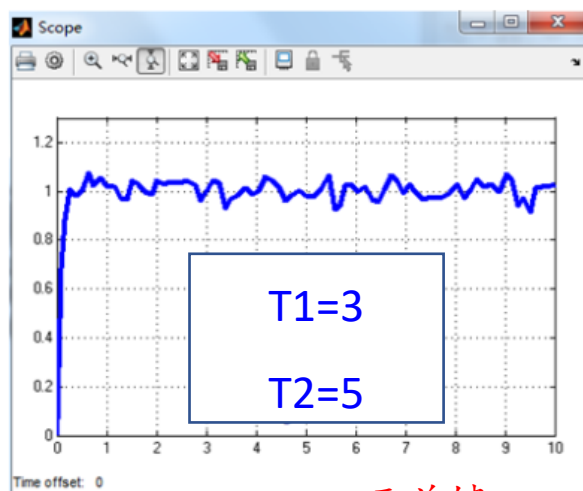
当扰动通道与控制通道的惯性接近时，选用静态前馈



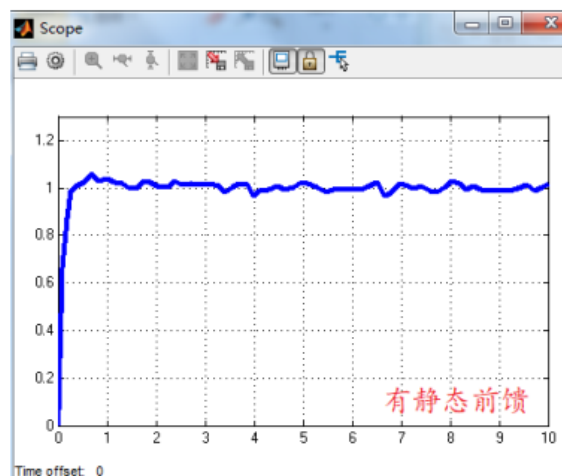
$$25(1 + \frac{1}{1.25s})$$

扰动通道时间常数 $T_1=3$

控制通道时间常数 $T_2=5$



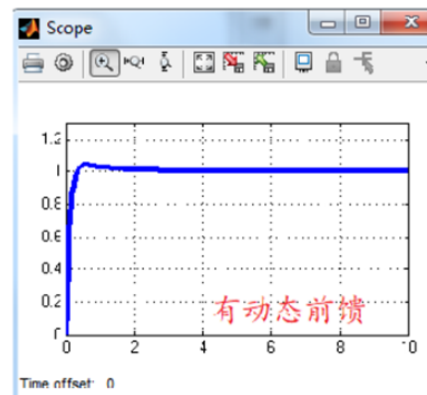
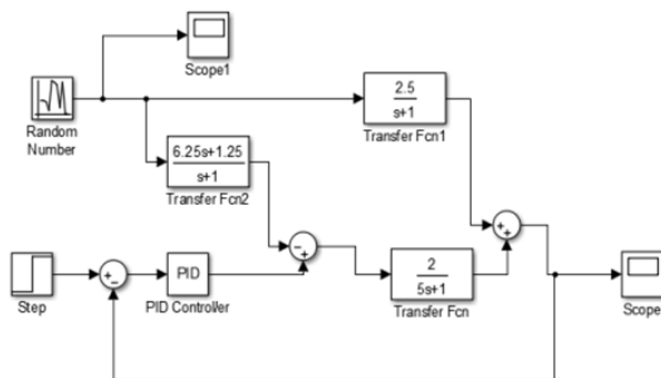
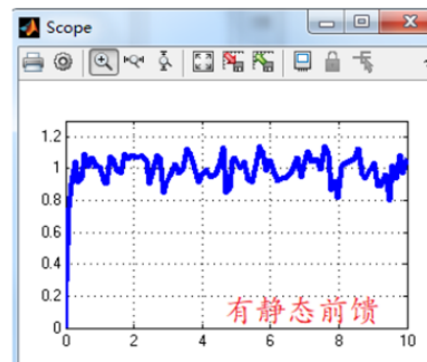
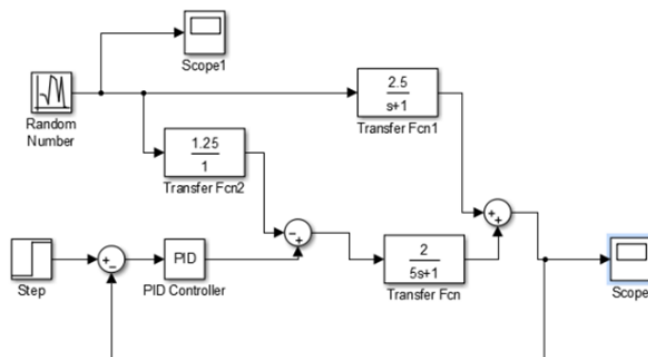
无前馈



为超前补偿，加快响应速度。

## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

当扰动通道的惯性小于控制通道的时候，选用动态前馈

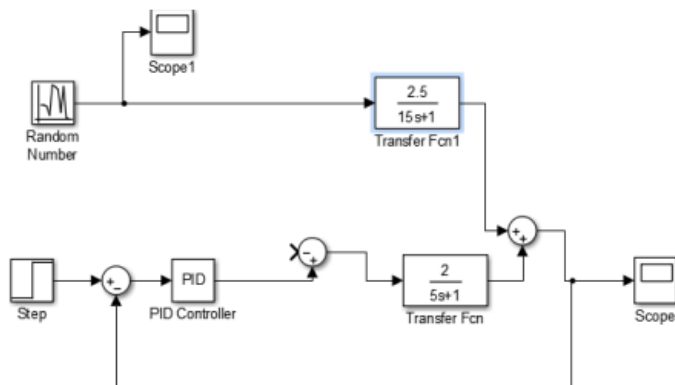


扰动通道时间常数 $T_1=1$ ；控制通道时间常数 $T_2=5$



## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构

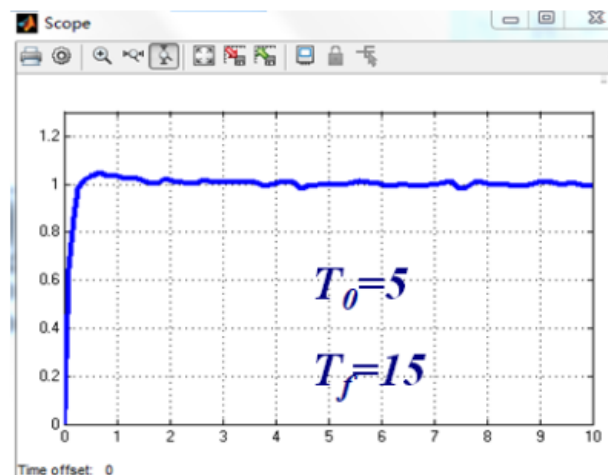
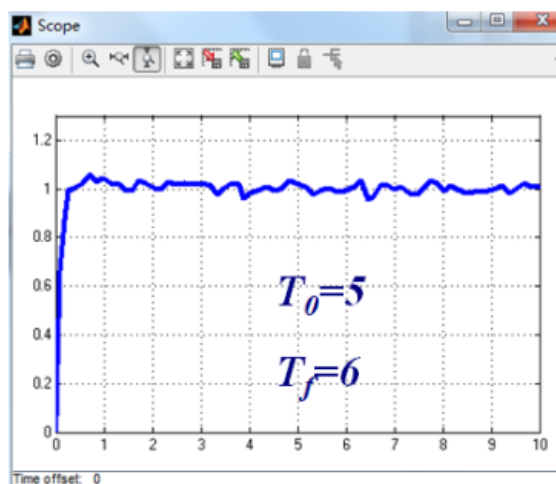
当系统扰动通道惯性明显大于控制通道的惯性时不必用前馈



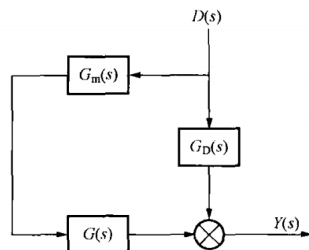
$$25\left(1+\frac{1}{1.25s}\right)$$

扰动通道时间常数 $T_1=5$

控制通道时间常数 $T_2=15$

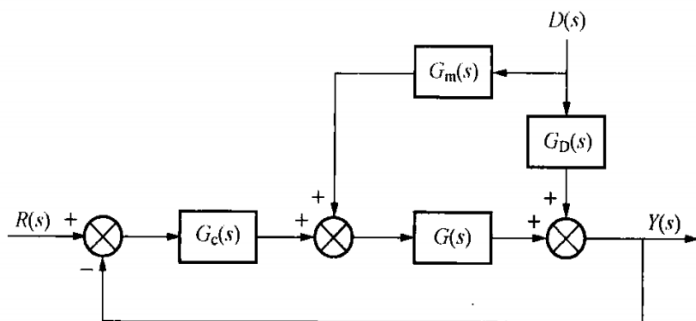


## 3.1.2 前馈控制系统的典型结构



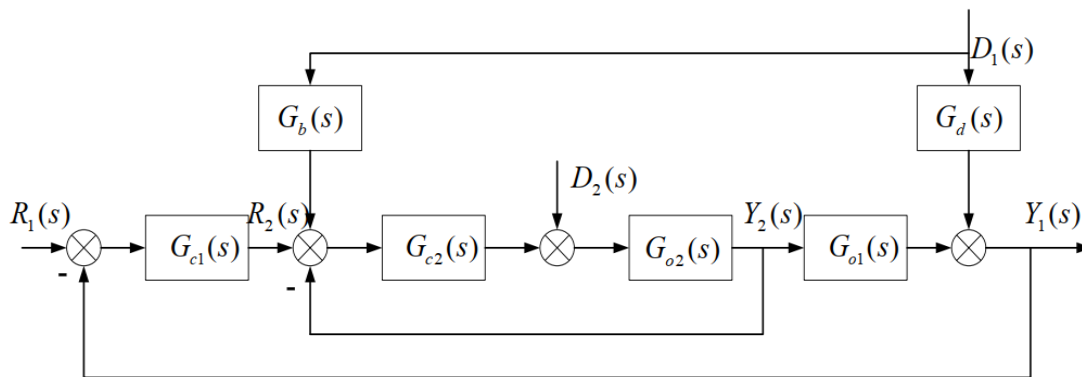
单纯前馈

工业中很少用



前馈-反馈

工业中用的最多



前馈-串级

系统中有两大扰动时考虑使用

# 第三章 复杂控制系统

## 3.3 前馈-反馈控制系统

(对应教材第六章)

3.1.1 前馈控制的基本原理

3.1.2 前馈控制系统的典型结构

3.1.3 前馈控制器参数的整定

3.1.4 工程应用实例

### 3.1.3 前馈控制器参数的整定

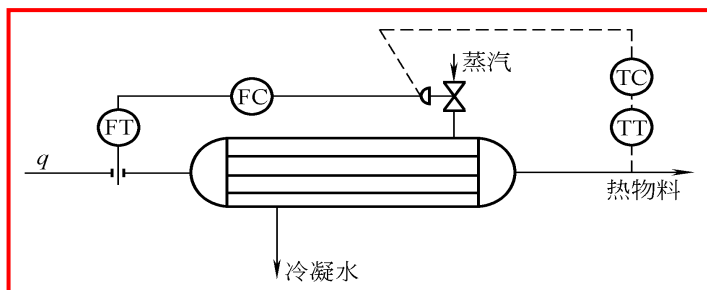
复合控制系统的参数分别整定，先反馈控制器参数，后前馈控制器参数。在整定反馈回路时，只考虑是反馈形成的闭合回路，具有适当的稳定性裕度，而不要考虑前馈部分。在整定前馈装置时，不考虑反馈的调节所引起的稳定性问题，直接用不变性原理整定。

前馈控制器参数的整定方法：

- 理论整定：需要准确知道干扰通道和控制通道的动态特性。
- 工程整定：前馈控制模型是由过程扰动通道和过程控制通道决定的，但准确获取过程扰动通道和过程控制通道的传递函数通常很困难，所以理论整定难以进行，目前广泛采用的是工程整定法是指在模型不知道的情况下，通过实验方法进行的：**看曲线，定参数！**

### 3.1.3 前馈控制器参数的整定

一、当对象的物理过程明确时，前馈控制器参数可进行理论设计



可按稳态时能量平衡关系写出下列方程：

$$q_0 H_0 = q_f C_p (T_2 - T_1)$$

$$T_2 = T_1 + \frac{q_0 H_0}{q_f C_p}$$

式中， $q_0$ 为热蒸汽的流量， $H_0$ 为蒸汽汽化潜热， $q_f$ 为冷物料流量， $C_p$ 为冷物料的比热。 $T_1$ 、 $T_2$ 分别为冷热物料的温度。

$$K_D = \frac{dT_2}{dq_f} = -\frac{q_0 H_0}{C_p} q_f^{-2} = -\frac{T_2 - T_1}{q_f}$$

$$K_0 = \frac{dT_2}{dq_0} = \frac{H_0}{q_f C_p}$$

静态前馈比例调节器即可实现：
$$K_B = -\frac{K_D}{K_0} = \frac{C_p (T_2 - T_1)}{H_0}$$

### 3.1.3 前馈控制器参数的整定

#### 二、前馈控制器参数的工程整定

相当数量的工业对象都具有非周期性与过阻尼的特性，经常可用一个一阶或二阶容量滞后，必要时再串一个纯滞后环节来近似。假设干扰通道和控制通道均为一阶惯性环节且具有延迟的环节：

干扰通道的  
传递函数为

$$G_D(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} e^{-\tau_1 s}$$

控制通道的  
传递函数为

$$G(s) = \frac{K_2}{T_2 s + 1} e^{-\tau_2 s}$$

$$G_m(s) = K_f \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1} e^{-(\tau_1 - \tau_2)s} = K_f \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}$$

目前针对  $\tau$  还没很好的工程整定方法，所以这里只是介绍前馈放大系数  $K_f$ ，以及  $T_1$ 、 $T_2$  的工程整定方法。

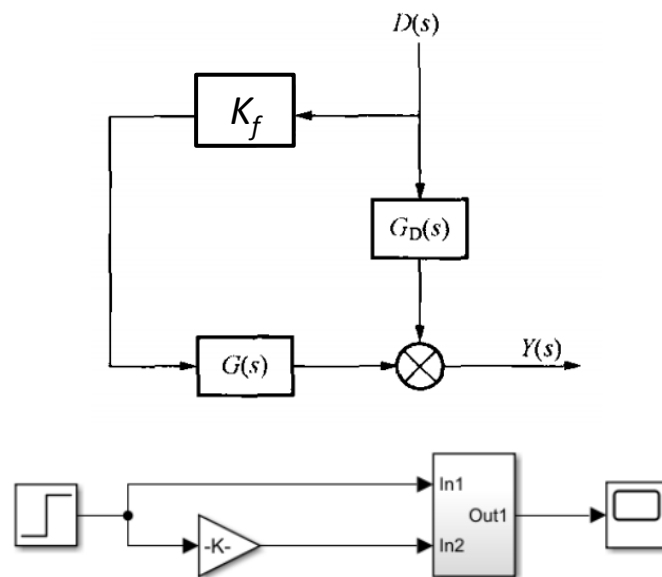
### 3.1.3 前馈控制器参数的整定

#### 二、前馈系数 $K_f$ 的工程整定

前面讨论，可从理论上求得静态前馈系数  $K_f$ ，但是许多工业对象难以求得这种关系，只有依靠工程整定的方法来求系数。对于单变量线性前馈控制系统， $K_f$ 是常数，其整定方法主要有开环整定和闭环整定两种。

##### 1. 开环整定法：

在工况稳定后，利用反馈控制使被控参数稳定在给定值，然后断开反馈回路，仅采用静态前馈控制，施加阶跃干扰，将 $K_f$ 值由小逐渐增大，直到被控参数回到给定值，此时对应的 $K_f$ 即是合适的前馈系数整定值。



### 3.1.3 前馈控制器参数的整定

#### 二、前馈控制器系数 $K_f$ 的工程整定

2. 闭环整定法：开环整定法的主要缺点是容易造成被调量失控的事故，故工程上常用闭环整定法。

##### (1) 前馈—反馈运行状态整定

- 断开开关K先独立整定PID参数，
- 断开开关K时增加扰动，观察曲线情况
- 闭合开关K，调节 $K_f$ 绝对值由小变大，观察曲线直到曲线达到理想情况：

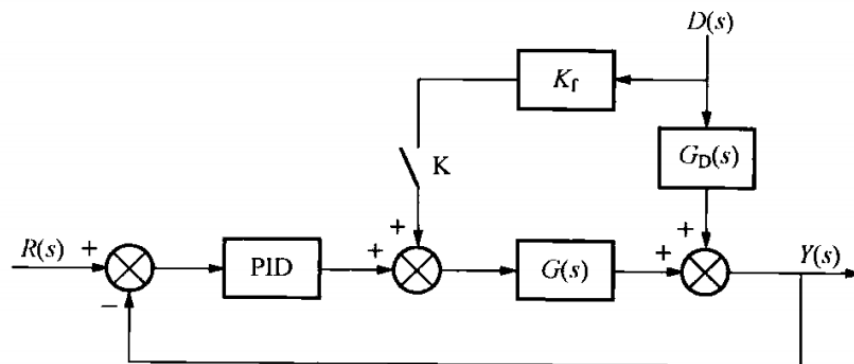
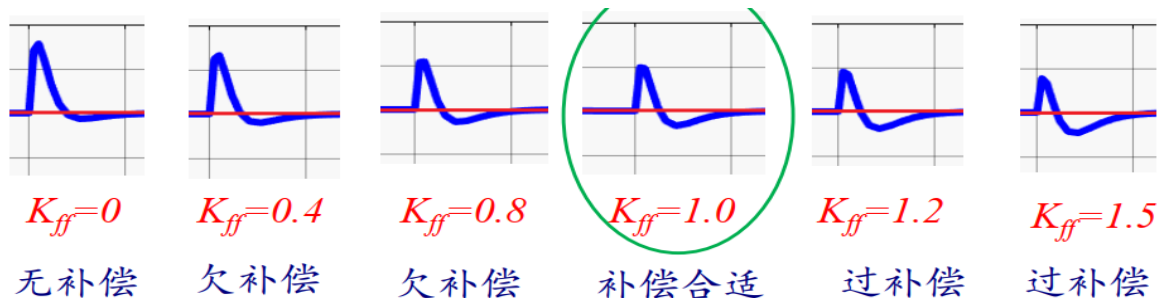


图 6-5  $K_f$  闭环整定法系统框图



理想情况：就是扰动产生的偏差与给定值之间正负面积基本相等。



### 3.1.3 前馈控制器参数的整定

## 二、前馈控制器系数 $K_f$ 的工程整定

### 2. 闭环整定法：

#### (2) 反馈系数整定方法

- ❑ 断开开关 $K$ ，将反馈系统处于稳定，
- ❑ 记下此时干扰的稳定值 $d_0$ 和控制器输出的稳态值 $u_0$ ，
- ❑ 然后施加干扰量为 $\Delta d$ 的阶跃扰动，待系统重新稳定后，记下输出 $u'$ ，则静态前馈系数的计算式为：

$$K_f = \frac{u' - u_0}{\Delta d}$$

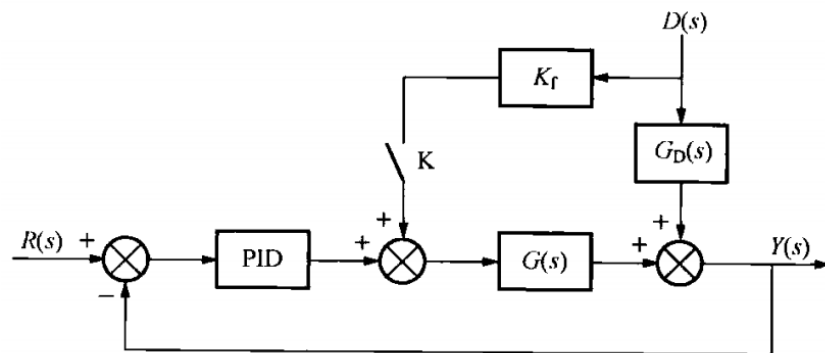


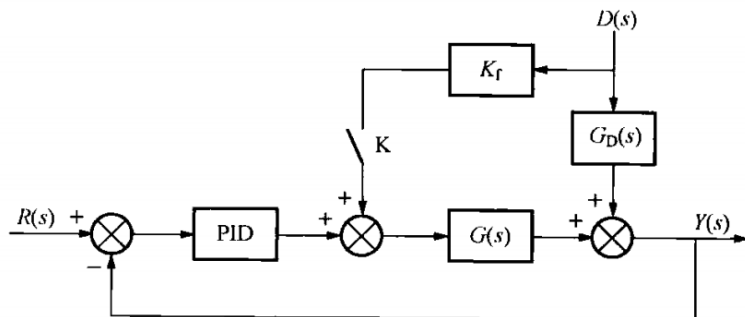
图 6-5  $K_f$ 闭环整定法系统框图

$$f_1=1, u_1=2 \quad f_2=1.5, u_2=2.5$$

$$K_{ff} = \frac{u_2 - u_1}{f_2 - f_1} = \frac{2.5 - 2}{1.5 - 1} = 1$$

### 3.1.3 前馈控制器参数的整定

#### 三、动态前馈控制器参数 $T_1$ 、 $T_2$ 的工程整定



$$G_m(s) = K_f \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1} e^{-(\tau_1 - \tau_2)s} = K_f \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1} e^{-\tau s}$$

看曲线、调参数的经验凑试法：

1. 在静态系数 $K_f$ 整定后，在单纯反馈控制下施加前馈干扰，记录响应曲线a。
2. 在前馈—反馈控制下运行系统并施加前馈干扰，记录响应曲线b、c。
3. 根据被调量的过程响应曲线判断 $T_1$ 、 $T_2$ 的大小和调整方向。

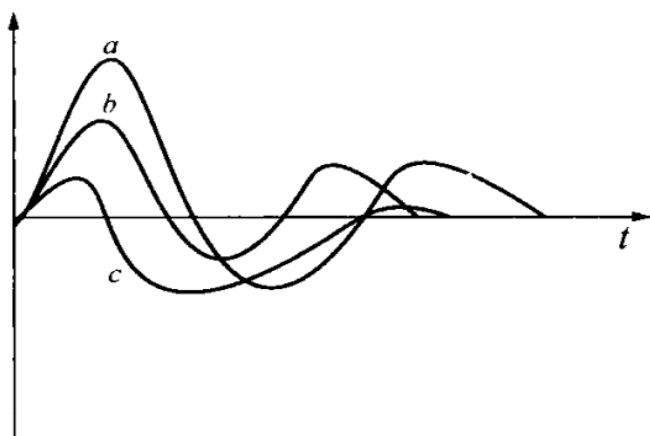
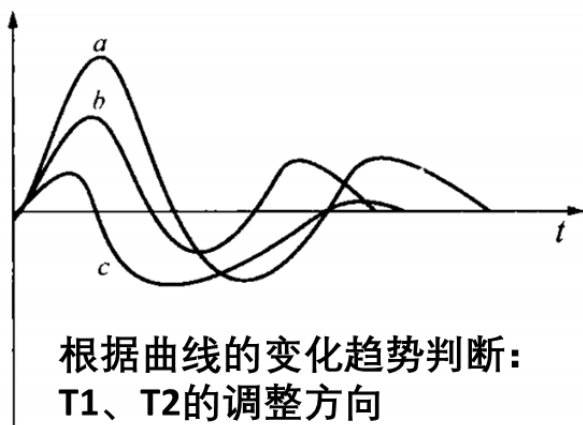


图 6-7  $T_1$ 、 $T_2$  大小的判别

## 3.1.3 前馈控制器参数的整定

### 三、动态前馈控制器参数 $T_1$ 、 $T_2$ 的工程整定



看曲线、调参数的经验凑试法：

4. 若 $T_1 > T_2$ ,  $T_1/T_2 = 1.5 \sim 2$ ；若 $T_1 < T_2$ ,  $T_1/T_2 = 0.5 \sim 0.7$ 。并以此作为初选数值，再施加前馈阶跃干扰，对 $T_1$ 、 $T_2$ 进行调整。

- 曲线a为单纯反馈控制的响应曲线，是趋势变化判断的基准。
- 曲线b的超调方向与曲线a的方向相同，欠补偿状态（滞后），表明干扰通道的时间常数 $T_1$ 小于控制通道 $T_2$ ，前馈动态参数的调整方向应该是增大 $T_1$ ，减小 $T_2$ ；
- 曲线c的超调方向与曲线a的方向相反，过补偿状态（超前），表明干扰通道的时间常 $T_1$ 数大于控制通道 $T_2$ ，前馈动态参数的调整方向应该是减小 $T_1$ ，增大 $T_2$ ；

# 第三章 复杂控制系统

## 3.3 前馈-反馈控制系统

(对应教材第六章)

3.1.1 前馈控制的基本原理

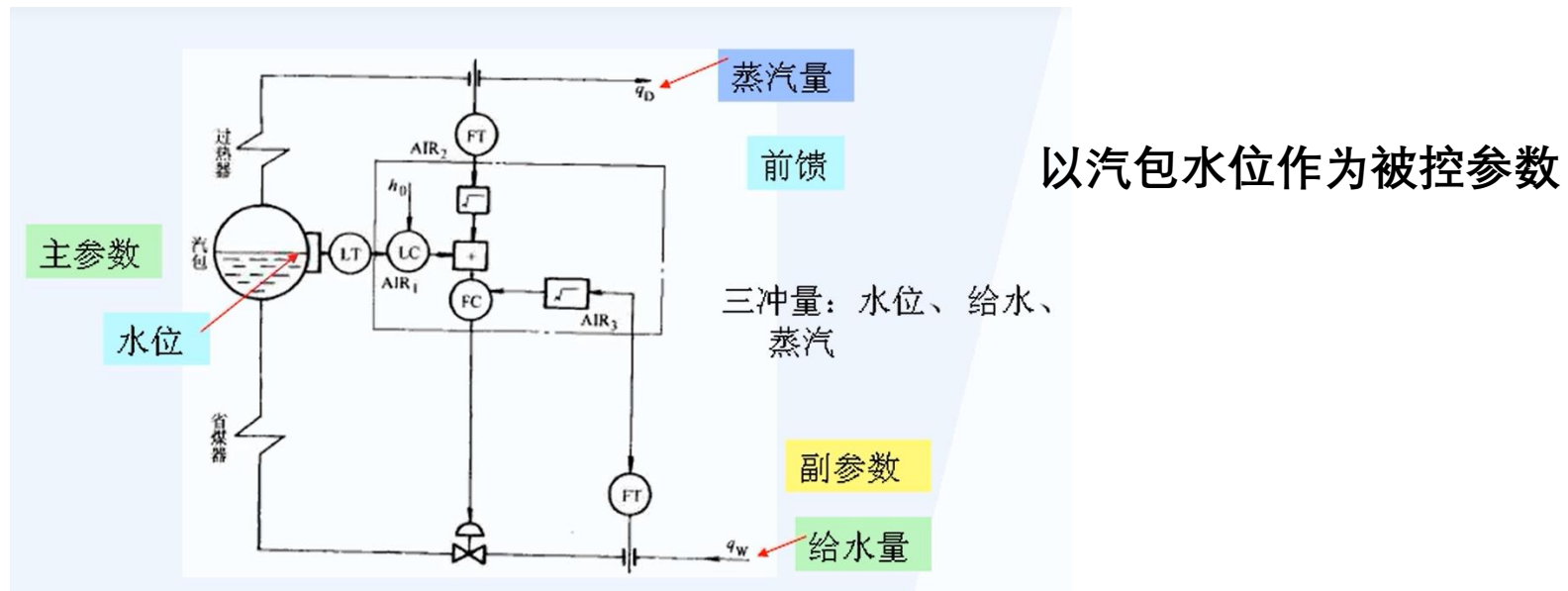
3.1.2 前馈控制系统的典型结构

3.1.3 前馈控制器参数的整定

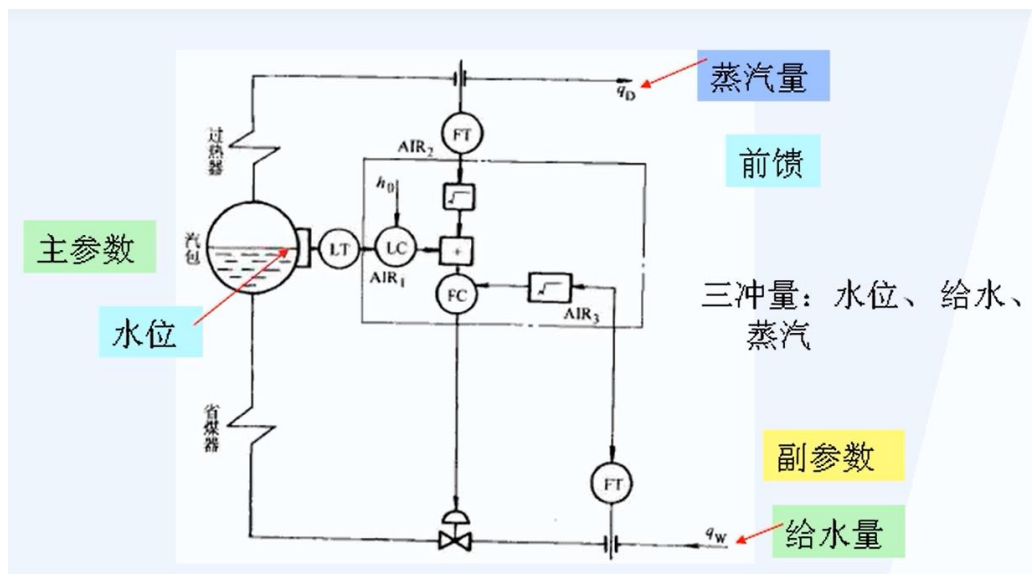
3.1.4 工程应用实例

## 锅炉给水前馈一串级三冲量系统

锅炉水位控制主要是为了保证锅炉的安全运行，为此必须维持锅炉汽包水位基本恒定(稳定在允许范围内)。



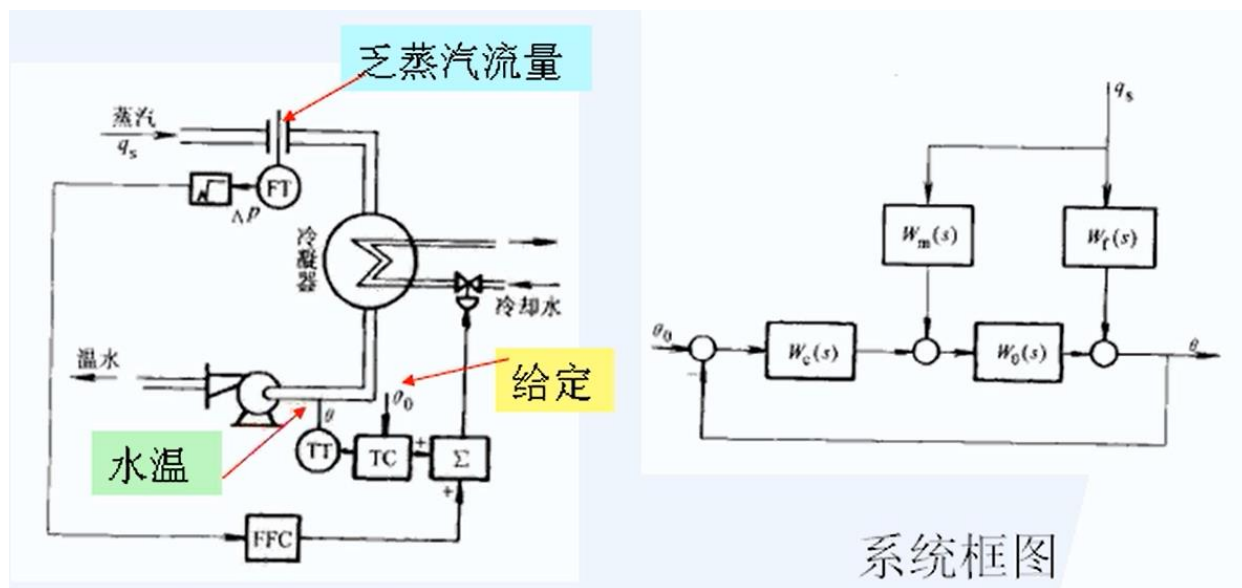
- 引起水位变化的扰动量很多，如锅炉的蒸汽量、给水流量、炉膛热负荷(燃料量)及汽包压力等。
- 给水流量的改变不但会影响到水位的变化，更主要的是可以起到稳定汽压的作用，故常把它作为锅炉燃烧控制系统中的一个控制量。
- 蒸汽量是锅炉的负荷，显然这是一个可测而不可控的扰动，对蒸汽负荷考虑采用前馈补偿。
- 为适应蒸汽负荷的变化，应以给水流量为控制变量



- **汽包水位信号是主信号，也是反馈信号**，在任何扰动引起汽包水位变化时，都会使调节器动作，以改变给水阀门开度，使汽包水位恢复到允许的波动范围内。因此，以水位为被控量形成的外回路能消除各和扰动对水位的影响，保证汽包水位维持在工艺所允许的变动范围内。
- **蒸汽流量是系统的主要干扰，而应用了前馈补偿后**，就可以在蒸汽负荷变化的同时按准确方向及时地改变给水流量，以保证汽包中物料平衡关系，从而保持水位的平稳。另外，蒸汽流量与给水流量的恰当配合，又可消除系统的静态偏差。

# 冷凝器温度前馈—反馈复合控制系统

系统采用**前馈—反馈**复合控制方式，利用乏蒸汽被冷凝后的温水温度信号控制冷却水的阀门开度，即由温度变送器(TT)、PI调节器(TC)、冷却水阀门及过程控制通道构成。



乏蒸汽流量是个可测不可控且经常变化的扰动因素故对乏蒸汽流量进行前馈控制，使冷却水流量跟随乏蒸汽流量的领化而提前变化，以维持温水的水温达到指定范围。

# 本章思考题

1. 前馈－反馈调节系统有哪几种典型结构？画出原理框图。
2. 前馈控制器的设计原则？
3. 前馈-反馈调节系统中，前馈调节器的作用点在反馈调节器之前或之后时，分别写出扰动对系统的传递函数？
4. 工程上如何整定静态前馈调节器的系数？



**本章结束！**